

На правах рукописи

ЕЛЬКИН Артем Юрьевич

ВЫСОТНО-СЕЗОННАЯ СТРУКТУРА ЦИРКУЛЯЦИИ СРЕДНЕШИРОТНОЙ
СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ И ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ
НА ЕЕ МЕЖГОДОВУЮ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

Специальность: 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

КАЗАНЬ – 2006

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Фахрутдинова А.Н..

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Белькович О.И.
доктор физико-математических наук,
профессор Рябова Н.В.

Ведущая организация: Казанский государственный энергетический университет

Защита состоится «29» июня 2006 г. в 10 часов в аудитории 210 физического факультета на заседании диссертационного совета Д 212.081.18 в Казанском государственном университете по адресу 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н. И. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан « » мая 2006 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.081.18,
д.ф.-м.н., профессор

Карпов А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Исследование динамических процессов атмосферы и оценка влияния солнечной активности на их характеристики является важным с точки зрения построения модели общей атмосферной циркуляции и адекватных моделей ионосферы, разработки методов прогнозирования изменений климата и определения причин таких изменений. Реалистические прогнозы возможных климатических последствий человеческой деятельности или вариаций солнечной активности могут быть осуществлены лишь на основе развития численных моделей общей циркуляции, адекватно воспроизводящих физические процессы, протекающие в верхней атмосфере, а также взаимодействие между верхней атмосферой и тропосферой. Разработка подобных моделей требует, прежде всего, детального понимания количественной стороны химических, физических и динамических процессов, относящихся к метеорологии верхней атмосферы.

Атмосфера Земли – сложная динамическая система, в которой наблюдается широкий пространственно-временной спектр движений. Важным аспектом исследования изменчивости термодинамического состояния атмосферы является поиск условий взаимосвязи процессов, развивающихся на различных высотных уровнях в интервале высот средней атмосферы.

При построении модели циркуляции средней атмосферы Земли, которая воспроизводила бы энергетически значимые пространственно-временные вариации ее основных термодинамических параметров, необходима оценка динамической эффективности атмосферных движений различных временных и пространственных масштабов. Эффективность вихревых потоков, создаваемых волновыми возмущениями в широком интервале временных и пространственных масштабов зависит от их природы и особенностей взаимодействия с преобладающими движениями.

Исследование эффектов влияния солнечной активности на динамические процессы атмосферы Земли в настоящее время является актуальной темой и вызывает большой интерес среди ученых-геофизиков, климатологов и метеорологов. Наиболее оживленную дискуссию в настоящее время вызывают те проявления солнечно-земных связей, которые определяют воздействие возмущений на Солнце и в межпланетной среде на климатические и погодные условия на Земле, на состояние нижней атмосферы. Связью с солнечными процессами могут быть объяснены наблюдаемые в атмосфере крупномасштабные изменения (потепление климата). Ввиду большой практической значимости проблема "Солнце — погода" является в настоящее время составной частью крупномасштабных международных программ "Энергетика солнечно-земных связей" (STEP), Международной геосферно-биосферной программы (IGBP), CAWSES и др.

Целью диссертационной работы является исследование динамических процессов среднеширотной нижней и средней атмосферы, определение высотной зависимости параметров преобладающей циркуляции и волновых возмущений; исследование межгодовых вариаций динамических процессов атмосферы и оценка воздействия на них солнечной активности.

Поставленная цель потребовала решения следующих задач:

1. Определение высотной зависимости среднемноголетних значений, амплитуд и времен максимума годовых и полугодовых колебаний скорости зонального и меридионального ветра, а также вариаций энергии фоновых движений, интенсивности планетарных волн, приливных движений и внутренних гравитационных волн для среднеширотной атмосферы в интервале высот 0-110 км.
2. Оценка динамической эффективности вихревых потоков при формировании режима зональной и меридиональной циркуляции среднеширотной атмосферы в интервале высот 0-110 км.
3. Исследование высотно-сезонной изменчивости планетарных волн в интервале высот нижней и средней атмосферы в поле зонального и меридионального ветра.
4. Исследование межгодовых вариаций среднегодовых значений, амплитуд годовых и полугодовых колебаний скорости ветра, а также интенсивности планетарных волн зональной и меридиональной циркуляции среднеширотной нижней и средней атмосферы. Оценка влияния солнечной активности на данные динамические процессы в зависимости от высоты.

Научная новизна состоит в следующем:

1. Впервые определена высотная зависимость среднемноголетних значений, амплитуд и времен максимума годовых и полугодовых колебаний скорости зонального и меридионального ветра, а также вариаций интенсивности планетарных волн (с временными масштабами 2-30 суток) и атмосферных возмущений с временными масштабами 1-24 ч (приливных движений и внутренних гравитационных волн) для региона Казани (56N,49E) за период 1992-2003 гг. для интервала высот 0-55 км и за период 1986-2002 гг. для интервала высот 80-110-км.
2. Впервые определены высотные зависимости параметров динамической эффективности вихревых потоков с масштабами планетарных волн (2-30 суток) и с масштабами приливов и внутренних гравитационных волн (1-24 ч) при формировании режима зональной и меридиональной циркуляции и их внутригодовых вариаций для региона Казани (56N,49E) за период 1992-2003 гг. для интервала высот 0-55 км и за период 1986-2004 гг. для интервала высот 80-110 км.
3. Впервые, на основе вейвлет анализа, определена высотно-сезонная изменчивость амплитуд атмосферных колебаний, имеющих периоды, характерные для атмосферных планетарных волн (10, 16 и 27 суток) в поле зонального и меридионального ветра для региона Казани (56N,49E) за период 1986-1992 гг. для интервала высот 0-31 км, за период 1992-2003 гг. для интервала высот 0-55 км и за период 1986-2002 гг. для интервала высот 80-110 км.
4. Впервые по длительному ряду измерений (за период 1992-2003 гг. для интервала высот 0-55 км и за период 1986-2002 гг. для интервала высот

80-110 км) для среднеширотной нижней и средней атмосферы для региона Казани (56N,49E) рассчитаны высотные профили параметров зависимости от солнечной активности среднегодовых значений, амплитуд годовых и полугодовых колебаний скоростей ветра, а также интенсивности планетарных волн в поле зональной и меридиональной циркуляции. По длительному ряду измерений (23-года) за период 1980-2002 гг. оценена спектральная плотность мощности в диапазоне временных масштабов 4-15 лет для межгодовых вариаций среднегодовых значений, амплитуд годовых и полугодовых колебаний усредненной по высоте в интервале 80-110 км скорости ветра. Обнаружены выраженные 11-летние вариации для среднегодовых значений и амплитуд годовых колебаний.

Практическая ценность настоящей работы состоит в следующем:

Рассчитанные высотные профили динамической эффективности вихревых потоков, среднемноголетних значений, амплитуд и фаз максимума годовых и полугодовых колебаний скорости зонального и меридионального ветра, а также вариаций энергии фоновых движений, интенсивности планетарных волн, приливных движений и внутренних гравитационных волн для среднеширотной нижней и средней атмосферы; а также проведенные оценки параметров зависимости от солнечной активности долгопериодных вариаций ветрового режима зональной и меридиональной циркуляции могут быть использованы для развития глобальных моделей циркуляции, построения долгосрочных климатических прогнозов динамики нейтрального ветра, развития адекватных моделей ионосферы. Результаты могут быть использованы для оценки солнечных факторов на термодинамический режим атмосферы и сравнения их с антропогенными факторами.

На защиту выносятся:

1. Полученная высотная зависимость среднемноголетних значений, амплитуд и времен максимума годовых и полугодовых колебаний скорости зонального и меридионального ветра, а также вариаций интенсивности планетарных волн с временными масштабами 2-30 суток и волновых возмущений с временными масштабами приливных движений и внутренних гравитационных волн (1-24 ч) для региона Казани (56N,49E) за период 1992-2003 гг. для интервала высот 0-55 км и за период 1986-2004 гг. для интервала высот 80-110 км.
2. Полученная высотная зависимость динамической эффективности вихревых потоков с временными масштабами 2-30 суток при формировании режима зональной и меридиональной циркуляции для региона Казани (56N,49E) за период 1992-2003 гг. для интервала высот 0-55 км и за период 1986-2004 гг. для интервала высот 80-110 км.
3. Полученная высотно-сезонная зависимость амплитуд атмосферных колебаний, имеющих периоды, характерные для атмосферных планетарных волн (10, 16 и 27 суток) в поле зонального и меридионального ветра для региона Казани (56N,49E) за период

1986-1992 гг. для интервала высот 0-31 км, за период 1992-2003 гг. для интервала высот 0-55 км и за период 1986-2002 гг. для интервала высот 80-110 км.

4. Полученные высотные профили параметров зависимости от солнечной активности среднегодовых значений, амплитуд годовых и полугодовых колебаний, а также интенсивности планетарных волн зональной и меридиональной циркуляции среднеширотной нижней и средней атмосферы для региона Казани (56N,49E) за период 1992-2003 гг. для интервала высот 0-55 км и за период 1986-2004 гг. для интервала высот 80-110 км. Оцененные спектральные плотности мощности межгодовых колебаний в диапазоне временных масштабов 4-15 лет для временных рядов среднегодовых значений, амплитуд годовых и полугодовых колебаний усредненных по высоте в интервале 80-110 км значений скорости ветра за период 1980-2004 гг. для региона Казани (56N,49E). Обнаруженные выраженные 11 летние вариации для среднегодовых значений и амплитуд годовых колебаний зонального и меридионального ветра.

Достоверность полученных результатов подтверждена статистикой многолетних радиометеорных наблюдений циркуляции верхней мезосферы-нижней термосферы, а так же методически обоснованной обработкой результатов измерений с оценкой значимости вычисляемых параметров. Методические рекомендации по применению представленных моделей основываются на статистико-вероятностном подходе к анализу временных рядов с учетом особенностей исследуемых процессов (в том числе их нестационарности).

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в измерениях параметров нейтрального ветра на радиолокационной станции с фазовым высотомером КГУ-М5.

Автором проведена адаптация метода непрерывного вейвлет-преобразования для анализа нестационарных временных рядов, содержащих шумы и разрывы в измерениях. Аналитически и модельно проведена оценка влияния шумов и разрывов в измерениях на результат вейвлет преобразования с использованием вейвлета Морле.

Автором спроектированы и реализованы на языке программирования C++ программные модули, обеспечивающие функциональность хранения и обработки многомерных научных данных, на основе которых автором было разработано программное обеспечение, позволяющее проводить спектральный и корреляционный анализ, вейвлет преобразование, аппроксимацию, синтез и фильтрацию временных рядов, оценивать спектральную плотность мощности исследуемых процессов с помощью классических и авторегрессионных методов (ковариационным, модифицированным ковариационным методом и методом Берга).

Автором были определены высотные зависимости основных параметров атмосферной циркуляции, исследуемых в диссертационной работе, параметров динамической эффективности вихревых потоков, а также параметров

зависимости долгопериодных вариаций ветрового режима атмосферной циркуляции от солнечной активности. По длительному ряду радиометеорных измерений проведен спектральный анализ межгодовых вариаций параметров атмосферной циркуляции. Автором получена высотно-сезонная зависимость амплитуд атмосферных колебаний, имеющих периоды, характерные для атмосферных планетарных волн в поле зонального и меридионального ветра.

Апробация работы и публикации. Результаты диссертации докладывались и были представлены на международных симпозиумах “Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics” (Tomsk 2003, 2004), на ”Всемирной Конференции по Изменению Климата (Москва 2002), на 35-й научной ассамблее COSPAR (Paris 2004), на всероссийской научной конференции “Современные глобальные и региональные изменения геосистем” (Казань 2004), на V Всероссийской молодежной научной школе «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» (Казань 2002), а также на научных семинарах и конференциях Казанского Государственного Университета (2001-2005 гг.).

Исследования по теме диссертации являются составной частью госбюджетной темы «Исследование волновой структуры циркуляции среднеширотной верхней мезосферы – нижней термосферы» (01.200.1.11805, 2001-2005 гг.), а также поддержаны грантами INTAS 03-51-5380, РФФИ 03-05-06317-мас, 04-05-65069, грантом для государственной поддержки молодых ученых Республики Татарстан 07-3 (Г) (2005 г.).

По результатам диссертации автором опубликовано 16 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 140 страниц текста, список литературы, который включает 161 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, ее цель, научная новизна и практическая значимость; формулируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации приводится обзор существующих на сегодняшний день исследований динамических процессов атмосферы и влияния вариаций солнечной активности на их изменчивость. В обзоре излагаются основные современные научные представления о физической природе, закономерностях и свойствах исследуемых в данной диссертации процессов нижней и средней атмосферы, а также их межгодовую изменчивость, связанную с воздействием солнечной активности.

Во второй главе диссертации исследуются вариации параметров преобладающей циркуляции и волновых возмущений в среднеширотной нижней и средней атмосфере и их высотная изменчивость, а также проводится исследование динамической эффективности крупномасштабных вихревых потоков в интервале высот 0-110 км для региона г. Казани (56N, 49E).

В целях исследования механизма взаимодействия между атмосферными слоями (высотными уровнями) большой интерес представляет изучение высотно-сезонной структуры фоновой циркуляции. На Рис. 1а представлены

высотные профили среднегодовых значений (A_0), а также амплитуд и времен максимума годовых (A_1, T_1) и полугодовых (A_2, T_2) колебаний зонального ветра. Установлено, что величины A_0 и A_1 зонального ветра в интервале высот верхней мезосферы – нижней термосферы значительно ниже по сравнению с высотами стратосферы. Максимальное значение A_0 и A_1 наблюдается на высотах стратосферы. В интервале высот тропо-стратосферы и верхней мезосферы (0-55 и 80-87 км) наблюдается превышение A_1 над A_2 . Для высот нижней термосферы (87-110 км) характерна обратная картина. В интервале высот тропопаузы – стратосферы T_1 наблюдается в зимний период и, по-видимому, сохраняется до высот 87 км. На высоте около 87 км имеется скачок T_1 , выше этого уровня время максимума годового колебания наблюдается в летний период, что, обусловлено сменой режима циркуляции зимой и летом в этом интервале высот.

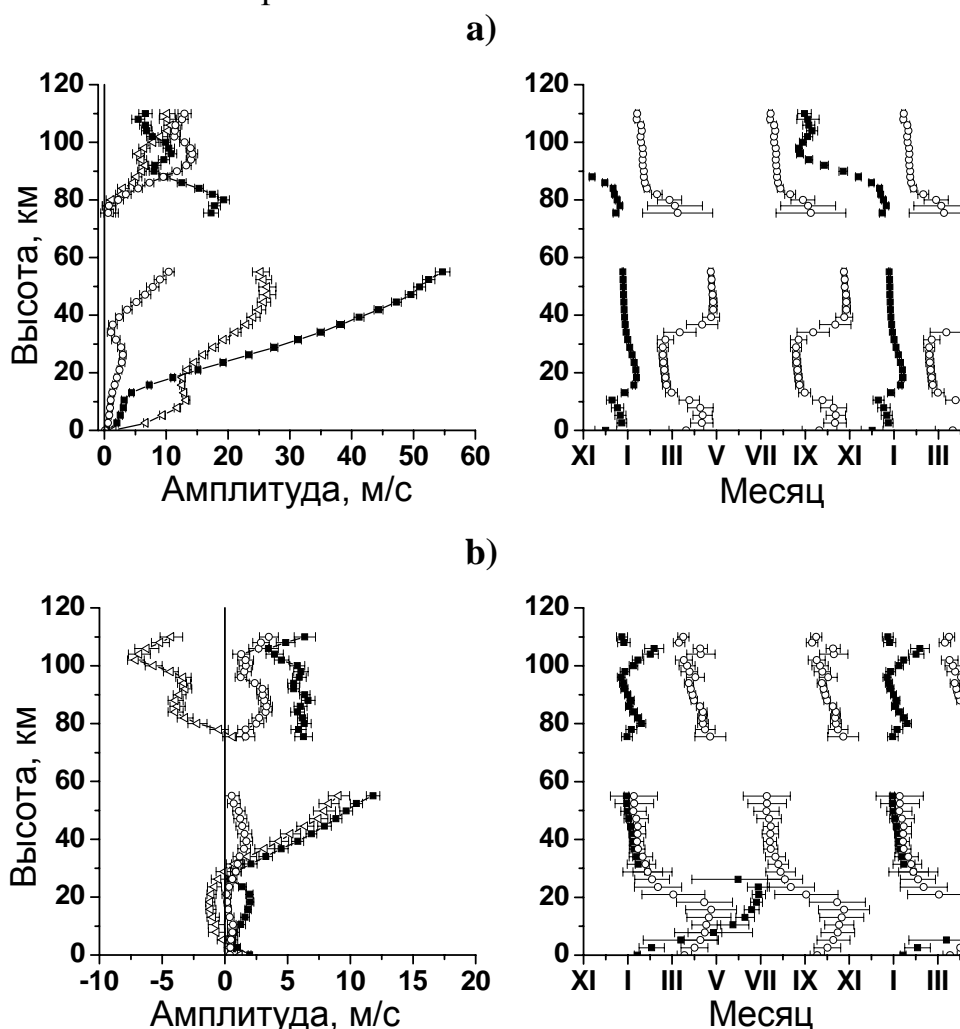


Рис. 1. Высотные профили среднегодовых значений (\circ — A_0), амплитуд годовых (\blacksquare — A_1) и полугодовых (\diamond — A_2) колебаний; времен максимума годовых (\blacksquare — T_1) и полугодовых колебаний (\diamond — T_2) зонального (a) и меридионального (b) ветра для региона г. Казани (56N49E).

Меридиональный ветер на высотах 0-55 км заметно меньше зонального. Для высот 80-110 км значения зонального и меридионального ветра соизмеримы. На высотах нижней стратосферы T1 меридионального ветра наблюдается в летний период, что обусловлено тем, что наблюдаемый годовой энергетический цикл нижней стратосферы определяется, прежде всего, вертикально распространяющимися в зимний период генерируемыми в тропосфере планетарными волнами и приводит к тому, что меридиональная циркуляция в нижней стратосфере северного полушария образует две термически противоположные ячейки. Выше 30 км, основной движущей силой среднего годового энергетического цикла является неравномерность нагрева солнечной радиацией. Циркуляция высот верхней мезосферы – нижней термосферы испытывает значительное воздействие волновых процессов, распространяющихся с высот тропо-стратосферы. В данной работе мы попытались найти связь интенсивности фоновой и вихревой циркуляции.

Характер внутригодовых вариаций интенсивности планетарных волн меняется в зависимости от высоты и определяется источником волновых возмущений, условиями их распространения в атмосфере и волновыми взаимодействиями. В верхней мезосфере – нижней термосфере вихревой поток является основной движущей силой меридиональной циркуляции. Различие высотных профилей амплитуд и фаз указывает на различие физических механизмов генерации годовых и полугодовых колебаний в том или ином интервале высот. Известно, что годовые колебания определяются радиационным нагревом, а также вихревыми потоками количества движения и тепла. Природа полугодовых колебаний определяется в основном вихревыми потоками. Последние, в свою очередь, при распространении снизу испытывают влияние динамических барьеров, связанных с высотной изменчивостью зонального ветра.

Рассчитаны высотные профили параметров A0, A1, T1, A2 и T2 интенсивности волновых возмущений с масштабами ВГВ и приливных волн в зональном и меридиональном ветре для высот 80-110 км. Для них характерно значительное преобладание среднесноголетних значений над годовыми и полугодовыми вариациями. Установлено, что динамическая эффективность волновых возмущений с масштабами ВГВ и приливных волн выше, чем динамическая эффективность интенсивности планетарных волн. Максимум годовых колебаний приходится на зиму, максимум полугодовых колебаний приходится на зиму и лето. На высоте до 87 км амплитуда годовых колебаний интенсивности волновых возмущений с масштабами ВГВ и приливов в зональном ветре меньше амплитуды полугодовых колебаний, выше этого уровня годовые колебания становятся больше полугодовых. Выше было указано, что для амплитуд годовых и полугодовых колебаний скоростей зонального ветра на высотах 80-110 км наблюдается обратная картина, что экспериментально подтверждает то, что ВГВ, приливы и преобладающие движения являются энергетически тесно связанными; диссипация ВГВ и приливов приводит к торможению преобладающего зонального ветра.

В качестве параметра эффективности вихревых потоков взяты отношения внутримесячной дисперсии среднесуточных значений скорости ветра к сумме квадрата скорости ветра и внутримесячной дисперсии суточных значений скорости ветра для зональной и меридиональной циркуляции:

$$K_U = \frac{\sigma_U^2}{U^2 + \sigma_U^2} \quad \text{и} \quad K_V = \frac{\sigma_V^2}{V^2 + \sigma_V^2}.$$

Аналогичным образом, также, были рассчитаны параметры эффективности (K'_U и K'_V) волновых возмущений с масштабами 1-24 ч (ВГВ и приливы), которые оценивались на основе отношения внутрисуточной дисперсии среднечасовых значений скорости ветра к сумме квадрата скорости ветра и внутрисуточной дисперсии среднечасовых значений скорости ветра. Были построены высотные профили параметров A_0 , A_1 , T_1 , A_2 и T_2 параметров K_U и K_V (см. Рис. 2).

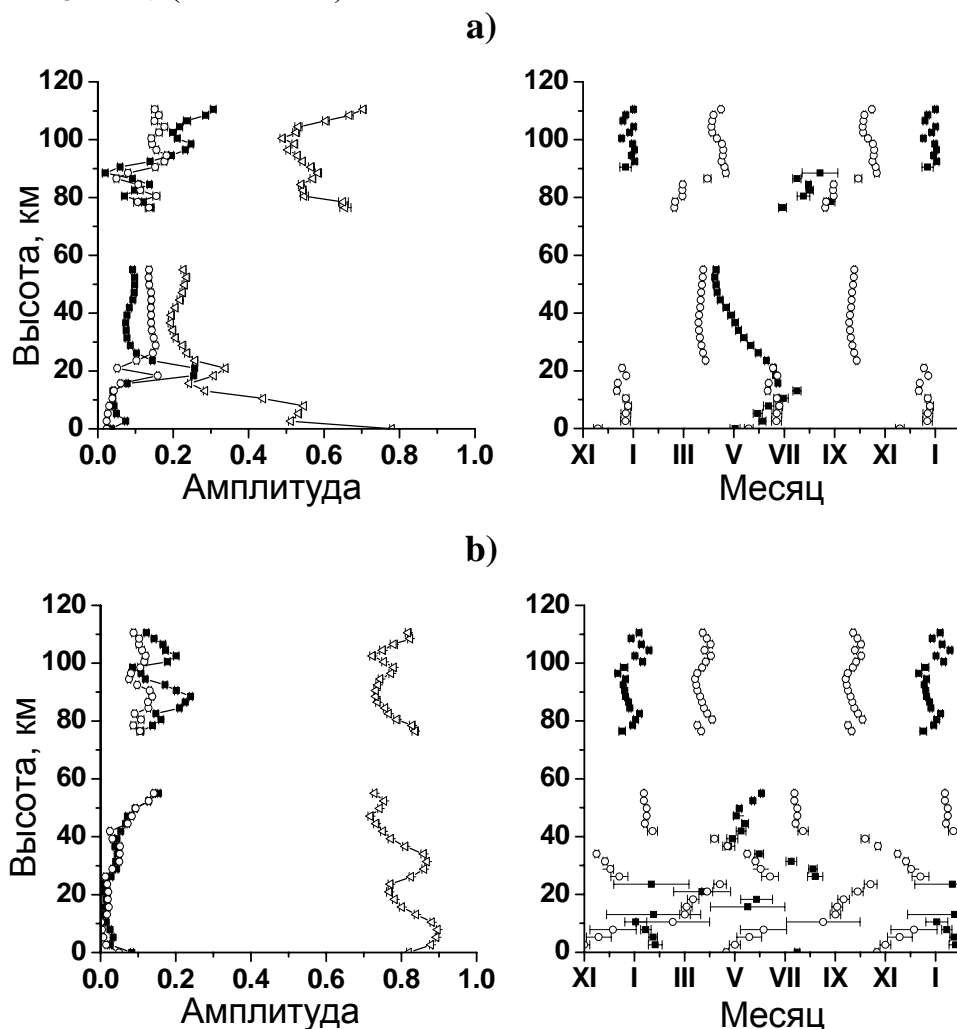


Рис. 2. Высотные профили среднемноголетних значений (\triangle — A_0), амплитуд и времен максимума годовых (\blacksquare — A_1, T_1) и полугодовых (\circ — A_2, T_2) колебаний параметров эффективности вихревых потоков атмосферы для зональной (a) и меридиональной (b) циркуляции.

Для высот верхней мезосферы – нижней термосферы характерно значительное увеличение эффективности крупномасштабной вихревой компоненты в поле зональной и особенно меридиональной циркуляции. Возрастание относительного энергетического вклада вихревых процессов на этих высотах связано с эффектами нелинейных взаимодействий волн различных масштабов и фоновых движений, что приводит к передаче энергии от одних процессов к другим.

Обнаружено, что в интервале высот стратосферы – нижней мезосферы параметр K_V примерно в четыре раза выше K_U . На высотах верхней мезосферы – нижней термосферы параметр K_V в среднем превышает K_U приблизительно на 50% и становится равным примерно 0,85. Таким образом, в общую энергетику меридиональных движений верхней мезосферы – нижней термосферы определяющий вклад дают мезомасштабные и крупномасштабные вихревые потоки.

На высоте около 20 км наблюдается локальный максимум среднегодовых значений K_U , а также его годовых и полугодовых колебаний и локальный минимум среднегодовых значений K_V . На этих высотах для полугодового колебания в поле зональной циркуляции наблюдаются скачки фазы максимума на полпериода: с января на апрель. В поле меридионального ветра наблюдаются значительные вариации фазы в интервале высот от 10-40 км. Поскольку высотная локализация выраженных особенностей поведения параметра эффективности совпадает с максимумом озонового слоя, можно предположить, что обнаруженные высотные закономерности связаны с возможным расположением на этих высотах критических слоев, влияющих на условия распространения и генерации волновых возмущений, обусловленных температурными градиентами.

Величины $T1$ и $T2$ для K_V отличается малой высотной изменчивостью на высотах мезосферы – нижней термосферы, в отличие от высот 0-40 км. На высотах около 85 км с ростом высоты наблюдается переход $T1$ K_U с июля на январь. На высоте ~85 км в поле зональной циркуляции, также, имеет место локальный максимум $A0$ и минимум $A1$ и $A2$ параметра эффективности вихревых потоков. Установленные особенности высотной структуры среднегодовых значений K_U и K_V , а также амплитуд и фаз их годовых и полугодовых колебаний, соответствуют смене режимов зональной циркуляции в исследуемом интервале высот (0-110 км).

В третьей главе диссертации изложен метод анализа нестационарных временных рядов на основе вейвлет преобразования, адаптированный для анализа используемых в данной работе временных рядов скоростей ветра, а также представлены результаты выполненных на основе данного метода исследований высотно-сезонной изменчивости амплитуд колебаний зонального и меридионального ветра, имеющих периоды, характерные для атмосферных планетарных волн (10, 16 и 27 суток) для региона Казани (56N, 49E) в интервале высот нижней и средней атмосферы.

Установлено, что внутригодовая изменчивость планетарных волн на высотах стратосферы в поле зональной и меридиональной циркуляции

определяется, прежде всего, годовым колебанием с максимумом в зимние месяцы, что связано с возникновением в это время условий проникновения тропосферных планетарных волн на высоты стратосферы. В летние месяцы тропопауза и нижняя стратосфера обладают задерживающим свойством для вертикально распространяющихся планетарных волн. На высотах тропосферы амплитуды 16-суточных колебаний скоростей зонального и меридионального ветра примерно в два раза меньше, чем на высотах стратосферы. В районе стратопаузы они достигают величин 40-45 м/с. В сезонных вариациях амплитуд исследуемых в данной работе планетарных волн на высотах тропосферы, помимо годовой цикличности, можно видеть колебания с периодом полгода, 4 и 3 месяца. Для высот верхней мезосферы – нижней термосферы также видно увеличение амплитуд 16-суточных колебаний не только в зимние месяцы; вариации их амплитуд на данном высотном интервале лежат в пределах от 0 до 15 м/с. Усиление планетарных волн в верхней мезосфере – нижней термосфере характеризуется высотной устойчивостью в высотном интервале 80-110 км.

В четвертой главе диссертации исследуются солнечные эффекты в вариациях A0, A1 и A2 скоростей ветра, а также величин интенсивности планетарных волн на высотах 0-55 км и 80-110 км для региона Казани. Для оценки влияния солнечной активности на упомянутые динамические процессы на основе оценки параметров линейной регрессии были рассчитаны коэффициенты их зависимости от солнечной активности. Методом наименьших квадратов были оценены амплитуды и фазы максимума 11-летней периодичности во временных рядах параметров исследуемых динамических процессов. Был выполнен спектральный анализ временных рядов A0, A1 и A2 зонального ветра, усредненного в высотном интервале 80-110 км для Казани (56N,49E) и Коллума (52N,15E).

Коэффициенты зависимости от солнечной активности рассчитывались на основе аппроксимации исследуемых временных рядов следующим аналитическим выражением:

$$\frac{A_i(h,t)}{A_i^{Max}(h)} = \alpha_i(h) \cdot \frac{F(t)}{F^{Max}} + \beta_i(h), \quad i=0,1,2,$$

где $\alpha_i(h)$ - коэффициент зависимости амплитуды i-й компоненты от солнечной активности; $A_i(h,t)$ - среднегодовые значения, амплитуды годовых и полугодовых колебаний исследуемого параметра для высоты h в момент времени t соответственно для i=0,1,2; $A_i^{Max}(h)$ - их максимальные значения, $F(t)$ - значения F10.7 в момент времени t. В качестве доверительного интервала коэффициента зависимости $\alpha_i(h)$ бралось его среднеквадратическое отклонение, что эквивалентно уровню значимости 0.67. Оценка корреляции в работе проводилась на основе рассчитанных коэффициентов ранговой

корреляции Спирмэна. Доверительные интервалы оценивались на уровне значимости 0,95.

На Рис. 3 приведены высотные профили коэффициентов корреляции и коэффициентов зависимости $\alpha_i(h)$ вариаций параметров зонального ветра A0 от солнечной активности. Из рисунка видно, что преобладающий зональный ветер в средней атмосфере испытывает воздействие солнечной активности, проявляющееся в его ослаблении.

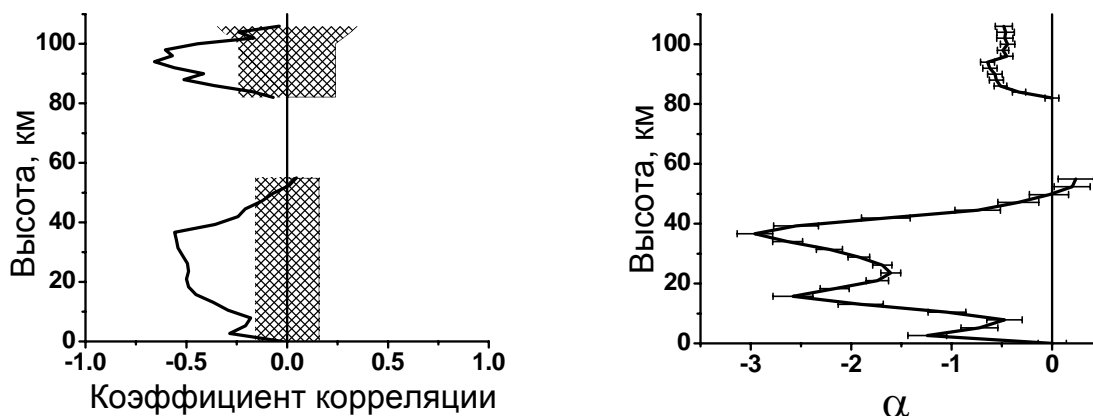


Рис. 3. Высотные профили коэффициентов корреляции и коэффициентов зависимости вариаций среднегодовых значений скоростей зонального ветра от солнечной активности для региона Казани (56N,49E) за 1986-2002 гг.

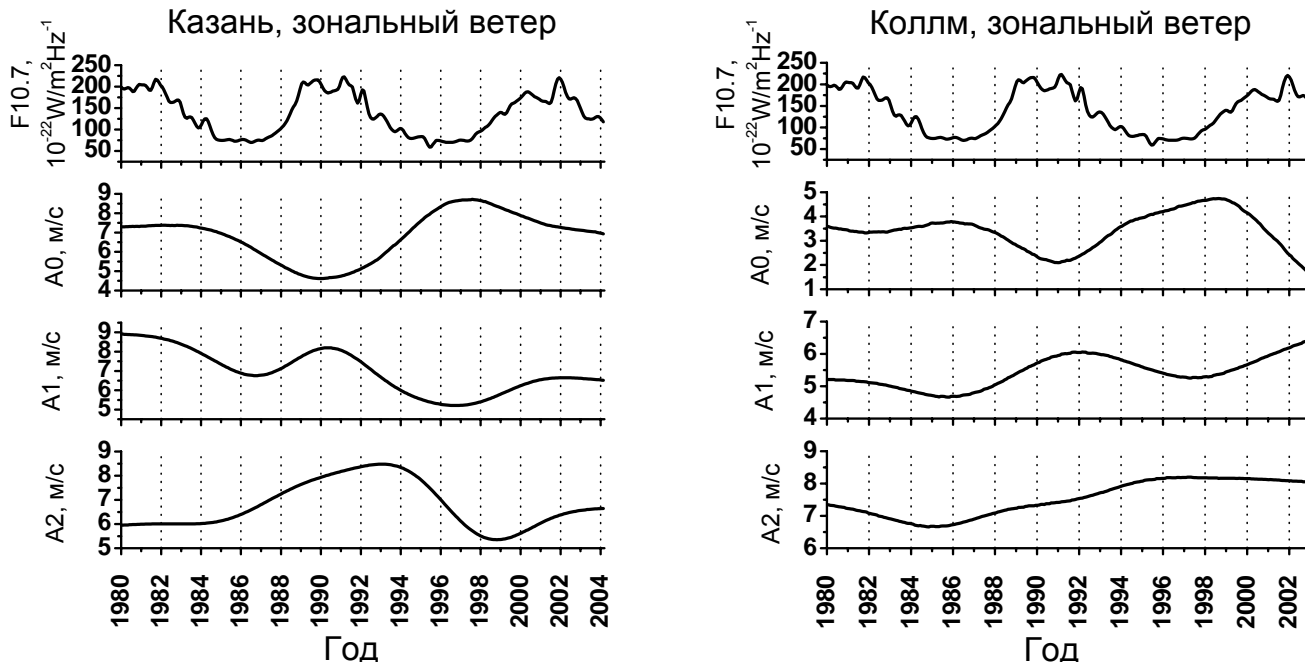


Рис. 4. Временные ряды вариаций параметра F10.7, средних значений (A0), амплитуд годовых (A1) и полугодовых (A2) колебаний усредненных в высотном интервале 80-110 км скоростей зонального ветра для региона Казани и Коллма.

На Рис. 4 представлены параметры A0, A1 и A2 зонального ветра для региона Казани (56N,49E) и Коллма (52N,15E). Из рисунков видно, что для

обеих станций величины A_0 зонального ветра имеют обратную зависимость от солнечной активности, в то время как для A_1 зависимость прямая. Рассчитанные спектральные плотности мощности (модифицированным ковариационным методом) вариаций параметров A_0 , A_1 и A_2 для Казани и Коллма представлены на Рис.5. На рисунках четко видны периодичности, близкие к 11 годам.

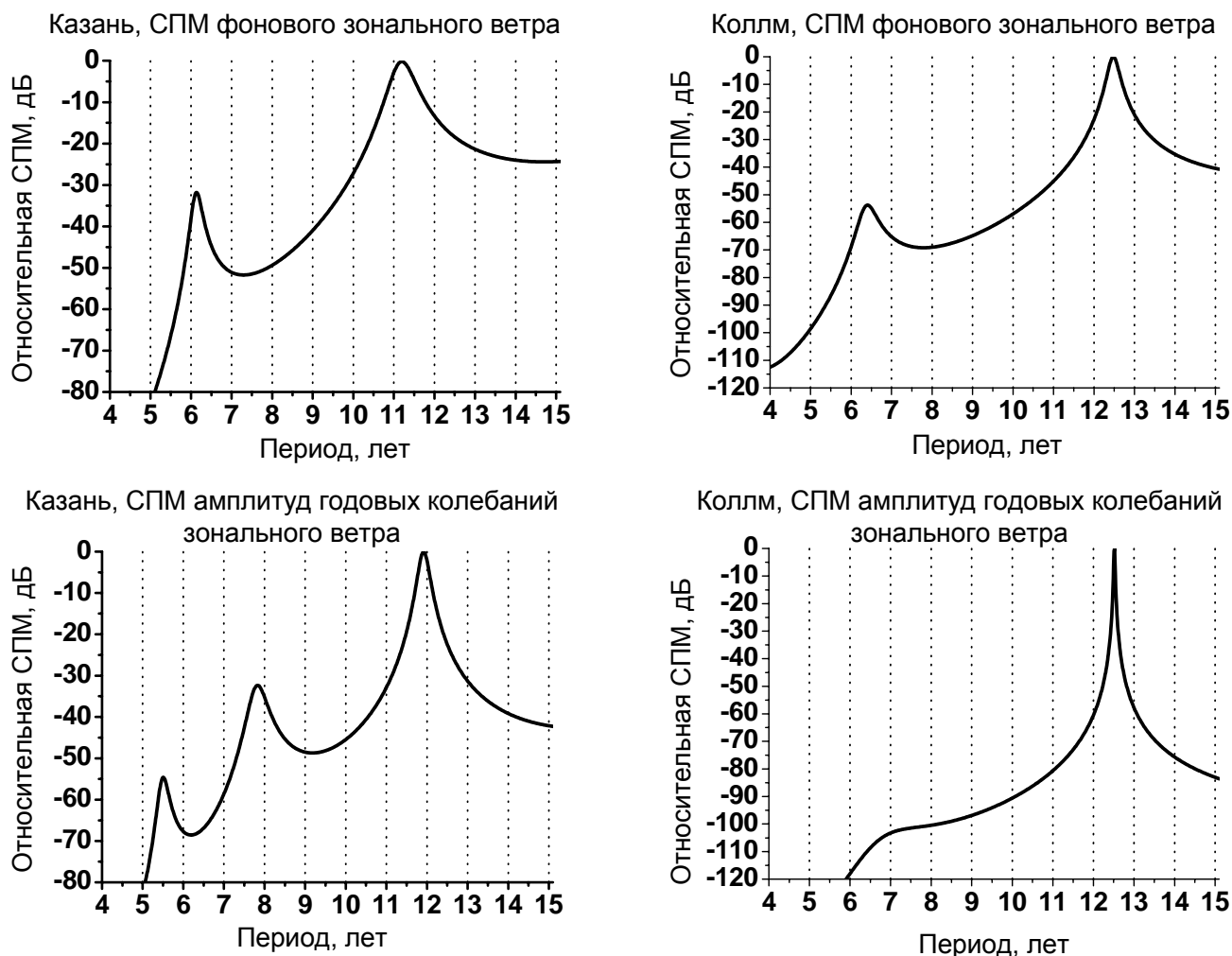


Рис.5. Спектральные плотности мощности временных рядов среднегодовых значений и амплитуд годовых колебаний усредненных в высотном интервале 80-110 км скоростей зонального ветра для региона Казани и Коллма.

Были рассчитаны значения разности фаз 11 летних колебаний параметров A_0 , A_1 и 11 летнего колебания параметров солнечной активности F10.7. Рассчитанные высотные профили амплитуд 11 летней периодичности, а также взятых с обратным знаком разностей фаз (их абсолютных значений) представлены на Рис. 6. Обратный знак модулей разности фаз брался в целях удобства сопоставления с полученными высотными профилями параметров. Разность фаз, близкая 180 градусам, выражает отрицательную зависимость от 11 летнего колебания параметров F10.7, близкая нулю – положительную.

Сравнивая высотные профили обратных разностей фаз и параметров зависимости от солнечной активности, можно заметить, что их высотная

зависимость во многом качественно повторяется. По всей видимости, наиболее выраженные солнечные эффекты в крупномасштабных динамических процессах атмосферы обусловлены в основном 11-летней периодичностью вариаций солнечной активности.

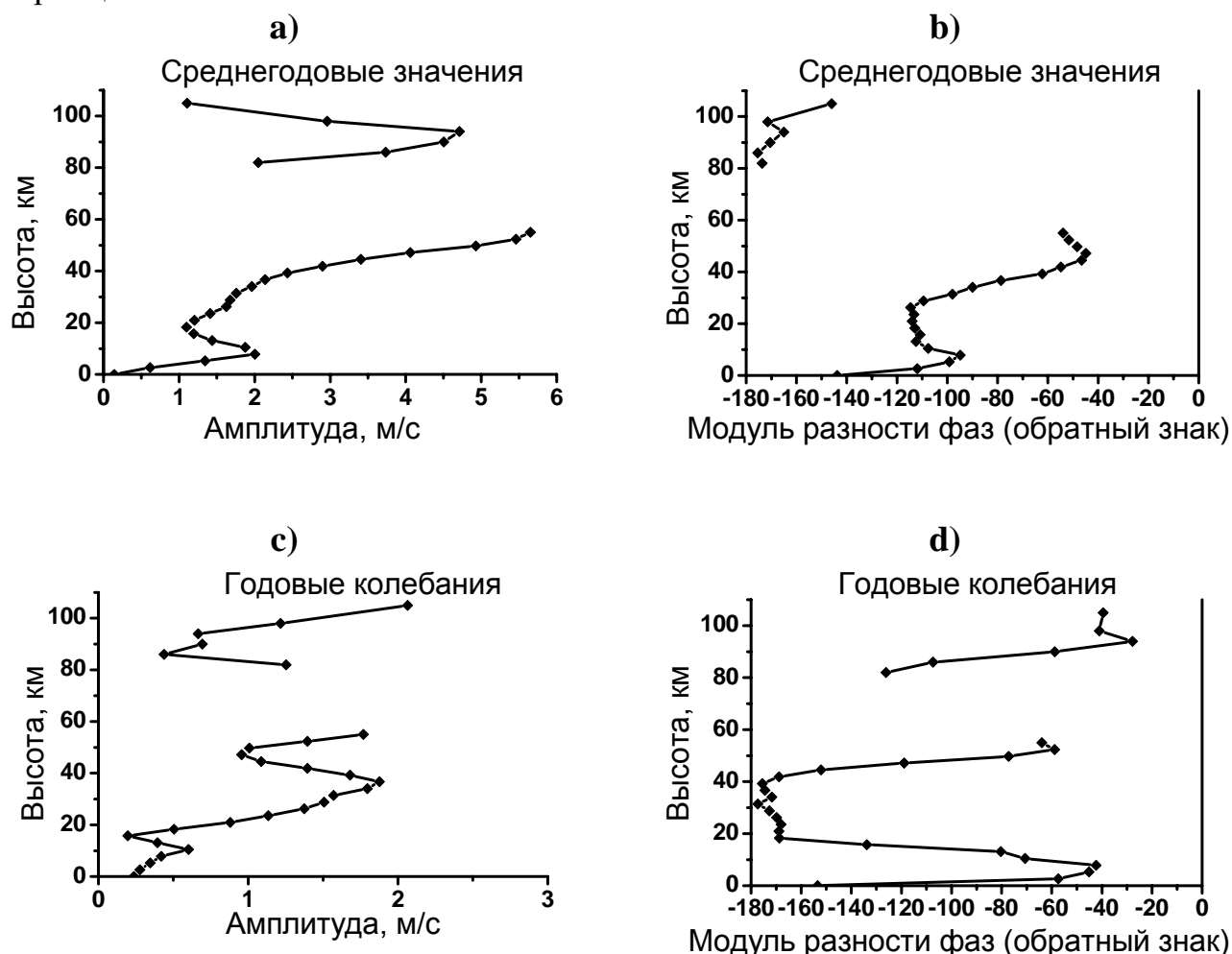


Рис. 6. Высотные профили амплитуд 11-летних периодичностей во временных рядах среднегодовых значений (а), а также амплитуд годовых (с) колебаний зонального ветра за период 1986-2002 гг. в высотном интервале 80-110 км, а также за период 1992-2003 гг. на высотах 0-55 км. Значения модуля разности их фаз и фазы 11-летнего колебания вариаций параметров солнечной активности F10.7, взятые с обратным знаком (b,d).

Заключение. На основе анализа многолетних временных рядов скоростей ветра среднеширотной нижней и средней атмосферы, полученных по данным радиометеорных измерений для региона Казани (56N,49E) в высотном интервале 80-110 км за период 1980-2003 гг., по данным NCEP/NCAR для высот 0-31 км за период 1986-2003 гг., а также по данным из архива BADC UKMO в высотном интервале 0-55 км за период 1992-2003 гг. были получены следующие основные результаты:

1. Определена высотная зависимость среднемноголетних значений (A_0), амплитуд и времен максимума годовых (A_1, T_1) и полугодовых (A_2, T_2) колебаний скорости преобладающего

зонального и меридионального ветра, вариаций интенсивности планетарных волн, а также вариаций интенсивности приливных и внутренних гравитационных волн (1-24 ч). Установлена тонкая высотная структура данных параметров, свидетельствующая о значительной изменчивости параметров зональной и меридиональной циркуляции в интервале высот тропо-стратосферы и верхней мезосферы – нижней термосферы. Обнаружено, что меридиональный ветер на высотах тропо-стратосферы в 2-4 раза меньше зонального; для высот верхней мезосферы – нижней термосферы значения зонального и меридионального ветра соизмеримы. На высотах 0-55 км и 80-87 км наблюдается превышение A_1 над A_2 для зонального ветра, что обусловлено преобладанием на этих высотах радиационных энергетических источников циркуляции, в то время как для высот 87-110 км характерно преобладание A_2 , как следствие значительной роли вихревых потоков при формировании режима циркуляции на данных высотах. Обнаружено, что амплитуда годовых колебаний интенсивности планетарных волн на высотах тропо-стратосферы в 2-3 раза превышает амплитуду ее полугодовых колебаний, тогда как на высотах 80-110 км они становятся соизмеримыми. Динамическая эффективность волновых возмущений с масштабами ВГВ и приливных волн выше, чем динамическая эффективность крупномасштабных планетарных волн.

2. Установлена высотная зависимость параметров динамической эффективности вихревых потоков, создаваемых волновыми возмущениями с временными масштабами 2-30 суток, важных при исследовании формирования режима зональной и меридиональной циркуляции на высотах нижней и средней атмосферы. Обнаружено, что динамическая эффективность вихревых потоков на высотах 0-110 км выше в поле меридионального ветра, чем зонального; на высотах стратосферы их различие достигает 300%. Эффективность вихревых потоков в поле зонального ветра на высотах 80-110 км в 2-3 раза выше, чем на высотах 10-55 км и сопоставима с высотами 0-10 км.
3. Определена высотно-сезонная зависимость (на основе вейвлет анализа) амплитуд атмосферных колебаний, с периодами 10, 16 и 27 суток, характерными для атмосферных планетарных волн в поле зонального и меридионального ветра. Обнаружено, что на высотах тропосферы амплитуды планетарных волн примерно в два раза меньше, чем на высотах стратосферы. В районе стратосферной паузы амплитуды достигают величин 40-45 м/с. Установлено, что внутригодовая изменчивость планетарных волн на высотах стратосферы определяется, прежде всего, годовым колебанием с максимумом в зимние месяцы, что связано с возникновением в это время условий проникновения тропосферных планетарных волн на высоты стратосферы. На высотах тропосферы, помимо годовой цикличности, обнаружены выраженные колебания с периодами полгода, 4 и 3 месяца. При этом амплитуды 10, 16 и

27-суточных колебаний для высот верхней мезосферы – нижней термосферы обнаруживают те же внутrigодовые вариации.

4. Получена (на основе линейной аппроксимации) высотная структура параметров эмпирической зависимости параметров A_0 , A_1 и A_2 преобладающего ветра, а также интенсивности планетарных волн от солнечной активности. Установлена отрицательная зависимость от солнечной активности вариаций A_0 зонального ветра на высотах 0-55 и 80-110 км, в то время как для меридионального ветра коэффициент зависимости от солнечной активности принимает отрицательные значения на высотах 0-30 км и положительные в интервале высот 30-50 и 90-110 км. Установлено, что межгодовая изменчивость A_0 и A_1 зонального ветра на высотах верхней мезосферы – нижней термосферы обнаруживает выраженные 11-летние колебания: в противофазе с вариациями параметра солнечной активности $F_{10.7}$ для A_0 и в фазе для A_1 .

Полученные результаты важны при развитии региональной и глобальной модели циркуляции с учетом волновой активности и солнечно-земных связей, адекватных моделей ионосферы, а также при разработке концепции экологии нижней и средней атмосферы Земли.

Основные результаты представленной диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Fahrutdinova A.N., El'kin A.Yu., Guryanov V.V. "Seasonal variations of planetary waves intensity in the middle atmosphere." // proc. of SPIE 2003, p. 235-243
2. Fahrutdinova A.N., El'kin A.Yu., Fedorov D.V. "The estimation of dynamical efficiency of vortex movements while the formation of regime of zonal and meridional circulation of midlatitude middle atmosphere" // proc. of SPIE 2004, PP.536-540
3. Фахрутдинова А. Н. Высотно-сезонная структура доступной потенциальной и кинетической энергии в нижней и средней атмосфере/ А. Н. Фахрутдинова, В. В. Гурьянов, А. Ю. Елькин // Физика атмосферы и океана. - М.: Наука/Интерпериодика 2006г. Т. 42 N 1, С.64-72
4. Fahrutdinova A. Height variability of solar effects on dynamical processes of middle atmosphere / Fahrutdinova A., Elkin A. and Guryanov V. // Advances in Space Research, 2005, [doi:10.1016/j.asr.2005.06.055](https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.06.055)
5. Fahrutdinova A.N., Korotyshkin D.V., Stepanov A.M., Ganin V.A., El'kin A.Yu., Fedotov A.V., Komarov A.Yu., Baskov S.A. "Wind regime of the mesosphere – lower thermosphere of the Earth" // proc. of SPIE 2004, PP.514-521
6. Фахрутдинова А.Н., Гурьянов В.В., Елькин А.Ю., "Воздействие солнечной активности на термодинамический режим нижней и средней атмосферы", // Материалы всероссийской научной конференции "Современные глобальные и региональные изменения геосистем", Казань, 19 октября 2004, С.401-403.
7. Елькин А.Ю., Фахрутдинова А.Н. Применение вейвлет-преобразования для анализа нестационарных временных рядов./ Когерентная оптика и оптическая спектроскопия. 2002, стр. 217-223

8. А.Н. Фахрутдинова, В.В. Гурьянов, А.Ю. Елькин, В.А. Ганин “Взаимосвязь зональной циркуляции с солнечной активностью в нижней и средней атмосфере”//Всемирная Конференция по Изменению Климата, Тезисы докладов, Москва 2003, с 392.
9. A. Fahrutdinova , A. Elkin, V. Guryanov “Height variability of solar effects on dynamical processes of middle Earth’s Atmosphere” // 35th COSPAR Scientific Assembly", 18-25 July 2004.
<http://cosis.net/abstracts/COSPAR04/03520/COSPAR04-A-03520.pdf>
10. A. Fahrutdinova , A. Elkin, V. Guryanov, A. Stepanov, A. Fedotov “Height structure of prevailing winds and wave activity in middle atmosphere” // 35th COSPAR Scientific Assembly", 18-25 July 2004.
<http://cosis.net/abstracts/COSPAR04/03470/COSPAR04-A-03470.pdf>
11. Fahrutdinova A.N., El’kin A.Yu., Fedorov D.V. “The estimation of dynamical efficiency of vortex movements while the formation of regime of zonal and meridional circulation of midlatitude middle atmosphere”, Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics. XI Joint International Symposium, Abstracts, 2004, June, 23-26, Tomsk, p. 174
12. Fahrutdinova A.N., Korotyshkin D.V., Stepanov A.M., Ganin V.A., El’kin A.Yu., Fedotov A.V., Komarov A.Yu., Baskov S.A. “Wind regime of the mesosphere – lower thermosphere of the Earth”, Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics. XI Joint International Symposium, June, 23-26, 2004, Abstracts, Tomsk, p. 170
13. A. N. Fahrutdinova, O. N. Sherstyukov, V. V. Guryanov, S. V. Maksyutin, A. Y. Elkin. Sporadic E layer under influence of dynamical processes in the MLT-region. //Abstract IUGG-2003, Sapporo, Japan, June 30 - July 11
http://www.jamstec.go.jp/jamstec-e/iugg/htm/abstract/abst/jsa02_p/019316-1.html
14. El’kin A.Yu., Guryanov V.V., Fahrutdinova A.N “Seasonal variations of planetary waves intensity in the middle atmosphere.”, Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics. X Joint International Symposium, June, 24-28, 2003, Tomsk, p. 153
15. Елькин А.Ю. Анализ временных вариаций скоростей ветра на высотах верхней мезосферы – нижней термосферы. / Труды общефакультетского научного физического семинара студентов. 2001, стр. 11-16
16. Елькин А.Ю. Вейвлет анализ атмосферных ветровых колебаний на высотах 92-95 км. Нелинейное взаимодействие планетарных и приливных волн. / Тезисы докладов студенческой научной конференции физического факультета казанского государственного университета 2001 стр. 11